

ZEITSCHRIFT FÜR ASTROPHYSIK

UNTER MITWIRKUNG
VON

K. GRAFF-WIEN · P. GUTHNICK-NEUBABELSBERG · H. KIENLE-
GÖTTINGEN · A. KOHLSCHÜTTER-BONN · A. KOPFF-BERLIN
H. LUDENDORFF-POTSDAM · K. LUNDMARK-LUND · F. PA-
SCHEN-BERLIN · K. SCHEEL-BERLIN · A. SOMMERFELD-
MÜNCHEN · R. STRAUBEL-JENA · M. WOLF†-HEIDELBERG

SOWIE DER
DEUTSCHEN PHYSIKALISCHEN GESELLSCHAFT

HERAUSGEGEBEN
VON

R. EMDEN

SCHRIFTFÜHRUNG:
W. GROTRIAN UND E. V. D. PAHLEN

FÜNFTER BAND
MIT 99 TEXTABBILDUNGEN



VERLAG VON JULIUS SPRINGER, BERLIN

1932

Étude de la couronne solaire en dehors des éclipses.

Par Bernard Lyot à Paris.

Avec 16 figures dans le texte. (Reçu le 29 Juillet 1932.)

La couronne solaire est un des objets célestes les plus intéressants, non seulement pour les astronomes mais surtout pour les physiciens, car la matière dont elle est constituée se trouve soumise à des conditions très différentes de celles que nous pouvons réaliser en laboratoire. Malheureusement, c'est aussi un des objets que l'on peut étudier le plus rarement: jusqu'à maintenant, la couronne n'avait pu être observée que pendant les éclipses totales soit, environ, pendant une minute par an, en moyenne. Son étude a nécessité de longues et coûteuses expéditions. Son éclat peu élevé et la brièveté des éclipses ont limité la dispersion des spectrographes et ont empêché d'utiliser le spectrohéliographe.

En présence de conditions aussi défavorables, un grand nombre d'astronomes et de physiciens ont cherché sans relâche, pendant un demi-siècle, une méthode permettant d'étudier la couronne en dehors des éclipses. La plupart d'entre eux tentèrent de reconnaître sa forme soit visuellement, soit par la photographie, au moyen de radiations diverses qui appartenaient d'abord à l'ultra-violet puis au spectre visible puis au début de l'infrarouge. Ces radiations étaient sélectionnées avec des écrans colorés ou avec un spectrohéliographe. D'autres observateurs, beaucoup moins nombreux, ont cherché à déceler la présence de la couronne, soit en analysant la lumière du ciel près du bord solaire, avec un spectroscopie ou un polariscopie, soit en recherchant les radiations infra-rouges que cette lumière peut contenir, avec un bolomètre ou des couples thermoélectriques.

Aucune de ces tentatives n'a permis de déceler la couronne avec certitude: la lumière coronale était toujours complètement noyée dans une lumière beaucoup plus intense qui provenait de la diffusion des rayons solaires par notre atmosphère, par les particules que celle-ci contient en suspension et par les pièces optiques des instruments d'observation.

Nous allons d'abord examiner ces diverses causes de lumière parasite et nous indiquerons les précautions qui ont été prises pour les éliminer. Nous décrirons ensuite les appareils installés à l'Observatoire du Pic du Midi. Nous exposerons enfin les résultats relatifs à la photographie directe des protubérances et de la couronne, à la polarisation de la couronne et aux raies brillantes de son spectre, obtenus pendant les étés 1930 et 1931.

Diffusion atmosphérique. Supposons le Soleil très haut et le ciel parfaitement pur. Vers le milieu du spectre visible, pour la longueur d'onde 5500 Å, la brillance du ciel près du bord solaire doit être sensiblement égale au millionième de celle du Soleil. Les parties intérieures de la couronne qui sont les plus lumineuses, ont, en moyenne, une brillance voisine de celle-ci à des distances du bord solaire comprises entre 1' et 4'. La diffusion moléculaire seule ne suffit donc pas pour masquer entièrement la couronne intérieure, elle doit seulement affaiblir ses contrastes.

La brillance de l'atmosphère varie, par rapport à celle de la couronne, en raison inverse de la quatrième puissance de la longueur d'onde. On devrait donc pouvoir la réduire au cinquième en utilisant les longueurs d'onde voisines de 8500 Å au moyen de plaques infra-rouges munies d'un filtre approprié et photographier la couronne intérieure presque sur fond noir. Malheureusement, le voisinage immédiat du Soleil constitue une difficulté très importante; l'image solaire donnée par l'objectif d'une lunette ou par le miroir d'un télescope est toujours environnée d'un halo de lumière dont la brillance dépasse fréquemment un millier de fois celle de la couronne et qui empêche, évidemment, toute observation. Ce halo est dû à la diffusion et à la diffraction de la lumière solaire par les particules en suspension dans notre atmosphère et par l'instrument d'observation.

Diffraction par les particules en suspension dans l'air. En plaine, le ciel parfaitement pur est une chose extrêmement rare. Pour nous en rendre compte, choisissons une très belle journée et masquons le Soleil par un écran éloigné, le toit d'une maison, par exemple. Nous constaterons que le ciel, dont la teinte générale est un bleu assez foncé, devient plus blanc et beaucoup plus brillant lorsqu'on s'approche du bord solaire. Cet accroissement s'effectue parfois très brusquement, parfois d'une manière progressive et presque insensible mais il est beaucoup plus considérable qu'il ne le paraît à la simple observation.

J'ai mesuré fréquemment, depuis l'été dernier, la brillance du ciel à 20' du bord solaire, à travers un filtre rouge. Cette brillance est très variable: à Meudon et dans l'Ouest de la France, par très beau temps, elle est une centaine de fois supérieure à celle de l'atmosphère et dépasse le plus souvent 50 millionièmes de celle du Soleil. Les chiffres les plus faibles, de 15 à 20 millionièmes ont été trouvés à quatre reprises seulement. Ils sont encore au moins trois fois trop forts pour permettre d'obtenir, sur un cliché, quelques traces de la couronne. Ce halo de lumière qui environne le Soleil est dû à la diffraction des rayons solaires par quelques poussières ou par de légères nébulosités en suspension dans l'air; un voile de cirrus très ténu,

parfois même complètement invisible, suffit pour le produire. Lorsqu'il fait très beau, les grosses particules sont en petit nombre, elles illuminent très peu l'ensemble du ciel; la quantité de lumière qu'elles diffractent est, en effet, inférieure à celle de l'atmosphère mais, au lieu d'être uniformément répartie sur la voûte céleste, elle est concentrée, toute entière, dans les directions voisines de celles des rayons solaires incidents, ce qui la rend particulièrement gênante pour l'observation de la couronne. L'intérieur du halo est moins bleu que le ciel. Sa brillance, rapportée à celle de la couronne, varie à peu près en raison inverse du carré de la longueur d'onde, de sorte que l'emploi des plaques infra-rouges ne permet pas de la réduire suffisamment.

Pourtant, sur les sommets élevés des montagnes, lorsqu'il n'y a pas de cirrus et que l'air a été purifié, par une chute de neige par exemple, cette cause de lumière parasite disparaît presque complètement. Au Pic du Midi, la brillance du ciel, près du bord solaire, devient parfois inférieure au double de celle de la couronne que l'on devrait pouvoir alors observer dans de bonnes conditions.

Il subsiste malheureusement encore la cause de lumière parasite la plus importante, la diffusion instrumentale.

Diffusion instrumentale. Lorsqu'on pointe une lunette ou un télescope sur la couronne il est, en effet, pratiquement impossible de l'abriter contre la lumière du Soleil qui éclaire directement l'objectif ou le miroir dans des directions très voisines de celles dans lesquelles on observe. Une petite fraction de cette lumière se trouve diffusée par les pièces optiques et forme un halo autour de l'image solaire. Ce halo est très faible si on le compare au Soleil mais il est très intense si on le compare à la couronne. Dans les conditions habituelles, sa brillance atteint facilement un millier de fois celle de la couronne intérieure. Avec une lentille simple, elle est moins grande mais encore très considérable.

Formons, par exemple, avec une lentille simple, l'image d'une source lumineuse très intense sur un écran opaque qui déborde légèrement cette image. Si nous plaçons l'œil ou une petite lunette derrière le bord de l'écran, nous voyons directement d'où provient la lumière diffusée. La fig. 1 reproduit un cliché obtenu, dans ces conditions, avec une lentille de 8 cm. de diamètre et de 0,6 cm. d'épaisseur. La lentille est loin de paraître obscure :

1° Ses bords sont violemment illuminés par diffraction; ils apparaissent en noir par inversion photographique et ils ont produit, dans la plaque, un large halo de diffusion.

2° Nous voyons des traînées lumineuses parallèles dues à des fils présents dans le verre; même les plus légers diffractent une lumière gênante.

3° La lentille se trouve couverte de points lumineux dûs à la diffraction des ondes incidentes par une petite bulle située à l'intérieur du verre, par de légères piqures des surfaces et par de fines poussières déposées sur elles. Ces défauts apparaissent même dans la partie centrale qui a été polie et nettoyée avec le plus grand soin.

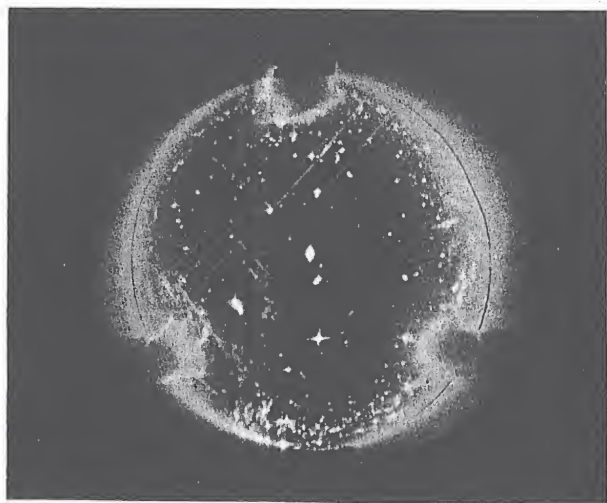


Fig. 1. Lentille simple photographée au moyen de la lumière qu' elle diffuse.

4° Le centre de la lentille est occupé par une tache lumineuse; cette tache est une image de la source produite par réflexion sur les deux faces de la lentille.

Chacune des sources de lumière parasite qui apparaissent sur ces clichés suffirait, à elle seule, pour masquer entièrement la couronne. Un objectif à plusieurs verres ou le miroir d'un télescope diffuserait encore plus de lumière.

Coronographe. J'ai cherché à réaliser un coronographe qui élimine toutes ces lumières parasites¹⁾.

La pièce principale de l'appareil est une lentille plan-convexe de 13 cm de diamètre et de 3,15 m de distance focale. Elle a été taillée à l'Institut

¹⁾ Comptes Rendus des réunions de l'Institut d'Optique — 4^e réunion — 6 Avril 1931.

d'optique dans du verre d'optique Parra-Mantois, spécialement sélectionné. Elle a été travaillée et polie avec le plus grand soin et elle ne possède aucun fil, aucune bulle et aucune rayure ou piqure de surface dans sa partie centrale, sur la moitié de son diamètre environ.

Cette lentille est placée en *A* (fig. 2) et elle forme l'image du Soleil sur un disque *B* en laiton noir qui déborde le Soleil d'une quinzaine de secondes seulement. Une lentille de champ *C*, placée derrière le disque, produit une image *A' A''* de la lentille *A* sur un diaphragme *D* dont le centre est occupé par un petit écran *E*. Les bords du diaphragme arrêtent la lumière diffractée par les bords de la première lentille. Le petit écran arrête la lumière des images solaires produites par réflexion sur les faces de

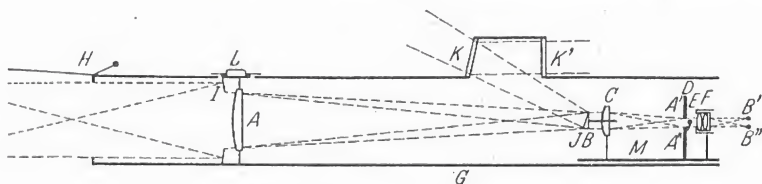


Fig. 2. Schéma du coronographe.

cette lentille. Derrière le diaphragme et l'écran, à l'abri de la lumière diffusée, un objectif *F*, très fortement corrigé, forme en *B' B''* une image achromatique de la couronne. Ces pièces sont fixées à une planche *M* qui peut coulisser pour permettre la mise au point de l'image solaire sur l'écran.

Toute l'optique est contenue dans un tube en bois *G*, de 5 m. de long, dont les parois intérieures sont enduites d'huile épaisse, le tube est fermé par un couvercle *H* que l'on ouvre seulement pendant les observations, la lentille *A* et sa monture obturent complètement le tube pour éviter les courants d'air. Les lentilles sont ainsi convenablement protégées contre les poussières.

Le couvercle *H* est en laiton argenté; un diaphragme concave *I* et un disque *J*, également argentés, renvoient à l'extérieur le rayonnement inutilisé, pour ne pas chauffer l'air contenu dans le tube du coronographe ce qui troublerait la netteté des images. Le rayonnement réfléchi par le diaphragme sort entièrement par l'ouverture du couvercle. Le rayonnement réfléchi par le disque argenté sort par les glaces *K* et *K'*.

Malgré les précautions prises, le nettoyage de la lentille doit être refait assez fréquemment et c'est une opération délicate. Pour retirer la lentille du tube, il suffit d'enlever le couvercle *L* auquel sa monture est fixée. On élimine assez bien les poussières en essuyant les surfaces, toujours dans le

même sens, avec du coton bien dégraissé et en soufflant constamment sur elles pour éviter que l'électrisation du verre ne fasse coller les particules de l'air ambiant. Il faut opérer rapidement et replacer la lentille dans le tube aussitôt après.

Choix d'une station. Pour obtenir de ce coronographe tous les résultats que l'on était en droit d'espérer, il fallait le placer dans une station où l'atmosphère soit assez souvent dépourvue de particules et le fixer sur une monture équatoriale très stable.

L'Observatoire du Pic du Midi présente, pour ce genre de recherches, des avantages que l'on ne trouve réunis nulle part ailleurs: son altitude est très élevée (2870 m.), il est éloigné des principaux sommets de la chaîne des Pyrénées et il domine la plaine de 2500 m. environ. Grâce à ces circonstances, l'observateur n'a plus, au-dessus de sa tête, que les deux tiers de notre atmosphère tandis qu'il a, sous ses pieds, la brume et les poussières de la plaine ainsi que les couches d'air les plus chargées en nébulosités diverses. Une mer de nuages très régulière se forme souvent à quelques centaines de mètres au-dessous de la coupole; au-dessus d'elle, le ciel est, la plupart du temps, exempt de cirrus; sa brillance, près du bord solaire, conserve parfois, une journée entière, une valeur voisine de celle qui correspond à la diffusion moléculaire.

D'autre part, l'Observatoire possède, une lunette double de 6 m. de long dont le tube, très rigide, est muni, sur toute sa longueur, de rails au moyen desquels on peut fixer commodément des appareils de grandes dimensions. Ce tube est porté par une monture anglaise extrêmement stable qui évite toute oscillation, même par les vents violents que l'on rencontre assez souvent à cette altitude.

Protubérances. Le coronographe était fixé le long du tube de l'équatorial. Muni d'un oculaire et d'un écran rouge, il montrait, même lorsque la transparence atmosphérique était médiocre, de nombreuses protubérances, les plus petites mesurant seulement quelques secondes de hauteur. Les images étaient très fines et possédaient de nombreux détails. La fig. 3 reproduit un cliché obtenu le 18 Juillet 1931 à 10h.; simplement en plaçant une chambre noire derrière l'oculaire. Le disque masquant l'image du Soleil se montre bordé d'une frange lumineuse fine qui est due, en partie à un phénomène de diffraction secondaire, en partie à l'agitation des images.

Lorsque les images étaient très calmes, on pouvait dépointer légèrement l'appareil et faire apparaître la chromosphère sous la forme d'une

ligne très nette formée, en grande partie, de lumière monochromatique. La chromosphère présentait, sous les protubérances, une épaisseur un peu plus grande que sur le reste de son contour. Lorsque le disque la masquait exactement, elle restait visible sous les protubérances qui se montraient soulignées par une ligne courte et très brillante. On devine seulement le phénomène sur ce cliché, il était très net visuellement mais difficile à photographier.

Les fig. 4 et 5 montrent deux protubérances photographiées avec deux secondes de pose et un rapport d'ouverture de $\frac{1}{90}$; la première, le 10 Juillet 1931 à 12h., dans l'angle de position 295° environ et la seconde le 30 Juillet 1931 à 8h., dans l'angle de position 60° environ. Les poses

Fig. 4.



Fig. 3.

Fig. 5.

Protubérances photographiées directement au coronographe en 1931.

Fig. 3, le 18 Juillet. Fig. 4, le 10 Juillet. Fig. 5, le 30 Juillet.

sont beaucoup plus courtes qu'avec un spectrohéliographe. Le système optique du coronographe étant aussi beaucoup moins compliqué, il doit pouvoir donner des épreuves plus nettes. Malheureusement, l'été dernier, il n'y a eu aucune protubérance remarquable.

Photographie directe de la couronne. J'ai réussi à photographier directement la couronne au mois de Juillet 1931. Le coronographe était muni d'un porte-chassis permettant de faire 12 images sur une plaque 9×12 . Il était porté par deux colliers en fer formant palliers au moyen desquels on le faisait tourner autour de son axe, entre chaque pose, d'une quinzaine de degrés. La comparaison des clichés ainsi obtenus permettait ensuite de distinguer les détails coronaux des défauts instrumentaux. Pour diminuer la diffusion, il y avait intérêt à employer une longueur d'onde aussi grande que possible, cependant le manque de contraste des plaques extrême-rouge et infra-rouge semblait devoir compenser les avantages que leur emploi

permettait d'obtenir. Ces circonstances m'ont conduit à faire les épreuves sur des plaques panchromatiques Guilleminot, à travers un écran Wratten α , au moyen des radiations du spectre continu comprises principalement entre 6600 et 6800 Å environ. Les plaques ont été développées à fond, avec un révélateur à contrastes.

Le disque noir du coronographe était recouvert, du côté de la plaque photographique, par un disque un peu plus petit en carton blanc, éclairé obliquement par un faisceau de rayons solaires. La brillance de ce diffuseur était les 5 millionièmes de celle du Soleil. Les poses photographiques étaient faites seulement lorsque la brillance du ciel, observée dans le coronographe, était égale ou inférieure à celle du diffuseur.

Le 21 Juillet à 16 h., 11 images ont été obtenues, par une transparence atmosphérique remarquable, avec des temps de pose de 5 secondes et un rapport d'ouverture de $1/20$; 5 d'entre elles sont voilées mais les 6 autres montrent une petite protubérance dans l'angle de position 50° et trois jets de lumière dont 2 sont nettement indiqués. Ces détails tournent, d'une pose à l'autre, avec la protubérance, en sens inverse de la rotation du coronographe et appartiennent, par conséquent, à la couronne. On voit également des taches qui occupent la même position sur chaque image. La plupart sont dûes à des poussières déposées sur la seconde lentille du coronographe.

Les contrastes des images de la couronne ont été amplifiés par le procédé suivant: les négatifs sont projetés successivement, avec un appareil à agrandissement, sur une plaque à grands contrastes en superposant exactement, à l'aide d'un dispositif approprié, les détails les plus nets.

Soit n le nombre de poses du négatif, γ le facteur de contrastes de la plaque positive. En première approximation, les faibles contrastes de l'objet photographié sont multipliés par γ , tandis que les irrégularités statistiques de distribution des grains sont multipliés seulement par γ/\sqrt{n} . Les taches légères ont leurs contrastes multipliés par γ/n et disparaissent si n est un peu grand. Si n est grand, il est bon d'éliminer les défauts de la plaque positive en tirant plusieurs positifs et en les superposant, à leur tour, pour former un négatif de seconde main. L'image finale doit montrer des détails beaucoup plus faibles que chacun des négatifs employés, à peu près en raison inverse de la racine carrée du nombre des poses utilisées.

La fig. 6 reproduit, sans retouche, une image obtenue ainsi avec les 6 négatifs du 21 Juillet. Elle montre, au centre, le diffuseur en carton éclairé obliquement par un faisceau de rayons solaires et placé devant le

disque métallique qui masque l'image du Soleil. L'ensemble est porté par une tige dont l'ombre apparaît dans 6 positions différentes qui indiquent les orientations du coronographe au cours des 6 poses utilisées. Le disque métallique est entouré d'une frange brillante dont l'éclat est beaucoup augmenté par une forte ondulation atmosphérique.

Autour de la frange, le positif montre la petite protubérance située dans l'angle de position 50° et quelques détails appartenant à la couronne. On voit une faible frange lumineuse, au pôle Nord, encadrée par deux brèches sombres situées à 25° de part et d'autre, celle du Nord-Ouest étant

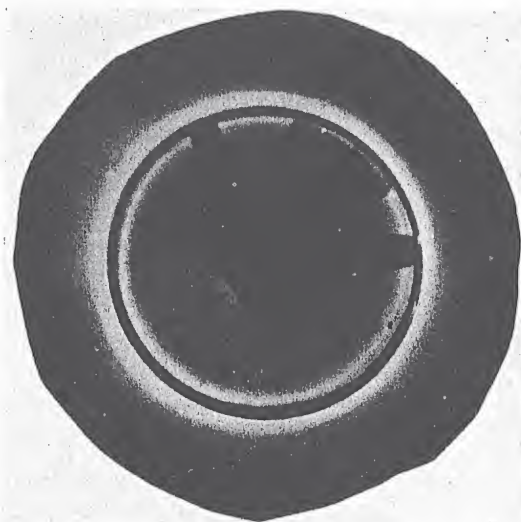


Fig. 6. Photographie directe de la couronne, obtenue avec 6 négatifs du 21 Juillet à 16 heures.

la plus foncée. A l'Est, un jet de lumière intense et bien défini s'étend de 30° à 95° et s'élève à plus de $7'$ du bord solaire. Un autre jet, plus étroit, de $4'$ de hauteur, apparaît entre 110° et 135° . Le bord Sud est faiblement lumineux, mais, vers 215° , une bande brillante apparaît et atteint son maximum d'intensité vers 260° . Elle s'affaiblit brusquement quelques degrés plus au Nord et se termine, vers 330° , à la brèche sombre signalée précédemment. La même photographie de la couronne a été reproduite au centre de la fig. 12 en masquant le milieu de l'image et la frange brillante par un disque noir qui représente le disque lunaire. On obtient ainsi l'aspect qu'offrirait la couronne intérieure lors d'une éclipse centrale dont la grandeur serait 1,06.

Cette image de la couronne se projette sur un fond lumineux dont la brillance est environ quatre millionièmes de celle du Soleil. On doit attribuer seulement le quart de cette brillance à la diffusion par l'air atmosphérique et une fraction encore plus faible à la diffusion par les particules qui étaient alors en très petit nombre. La diffusion par le coronographe demeurait donc la plus importante, malgré toutes les précautions prises; elle produisait un fond lumineux dont la brillance était 2 à 3 millionièmes de celle du Soleil. Il y aurait donc intérêt à perfectionner cet appareil, principalement en éliminant les poussières d'une manière encore plus complète.

Polarisation de la couronne. J'ai étudié la polarisation de la couronne en 1930, avec un polarimètre à franges précédemment décrit¹⁾. Cet appareil, sensible à une proportion de lumière polarisée de 1 millième, pouvait tourner de manière à déplacer les franges sur le ciel, tout autour de l'image solaire. Un cercle donnait l'angle de position du point observé, rapporté au centre du Soleil. Des fils fixes, tendus dans l'oculaire, permettaient d'évaluer la distance de ce point au bord solaire. Les mesures ont été faites lorsque le Soleil était à plus de 50° de l'horizon; elles ont donné les résultats suivants: au-delà de $7'$ du bord solaire, la polarisation du ciel était nulle, il en était de même de celle des halos blancs produits par les poussières et les cirrus. La polarisation commençait à apparaître à $6'$ du bord, elle augmentait rapidement vers le Soleil puis elle restait à peu près constante au-dessous de $3'$. Elle se montrait d'autant plus forte que le ciel était plus transparent; au contraire, le passage de nuages, même légers, la rendait insensible. On peut conclure de ce qui précède que la polarisation trouvée n'est pas d'origine atmosphérique; l'étude, en laboratoire, du système optique employé a montré qu'elle n'était pas instrumentale. C'est donc bien la polarisation de la couronne que l'on observe ainsi, réduite dans le rapport de la brillance de la couronne à celle du champ.

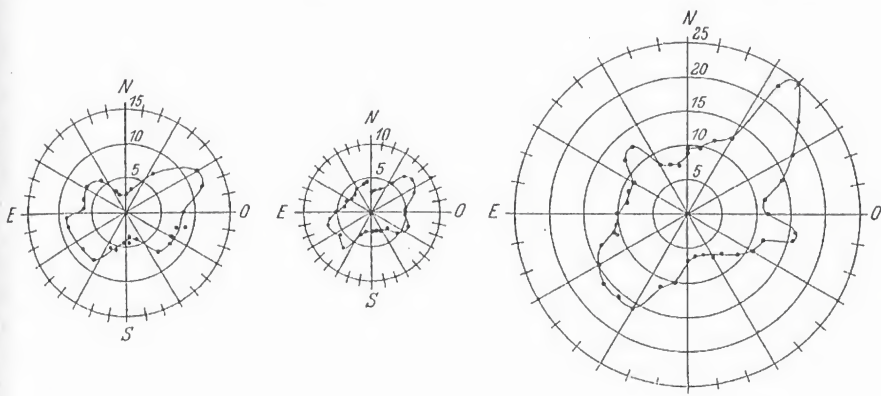
Les graphiques de la fig. 7 donnent les proportions de lumière polarisée trouvées dans les diverses directions, à une distance constante du bord solaire égale à $80''$ environ. Leur fermeture, quelquefois imparfaite, est due à une légère variation de la transparence atmosphérique au cours des mesures. Leur forme correspond sans doute aux inégalités de brillance de la couronne intérieure plutôt qu'à des inégalités de sa proportion de lumière polarisée. Ils montrent 2 minima, vers 10° et 190° , dirigés sensiblement suivant la ligne des pôles du Soleil et des maxima de part et d'autre de

¹⁾ Annales de l'Observatoire de Meudon — t. 8 fasc. 1 — 1929.

l'équateur. Cette forme correspond assez bien au type de couronne intermédiaire que l'on pouvait s'attendre à trouver en 1930, deux ans après le maximum d'activité du Soleil.

Spectre de la couronne. Presque toute la lumière de la couronne est répartie dans un spectre continu; la photographie directe et les mesures de polarisation dont nous venons de parler ont été obtenues avec des radiations de ce spectre.

Le reste de la lumière coronale est réparti dans quelques raies brillantes. Ces raies sont très faibles, mais, en revanche, le spectre continu de la lumière



29 Juillet à 12^h.

29 Juillet à 14^h30.

31 Juillet à 12^h.

Fig. 7. Proportion de lumière polarisée, exprimée en millimètres, mesurée à 80'' du bord solaire dans les divers angles de position.

diffusée, sur lequel elles se projettent, est très affaibli par la dispersion du spectroscopie. Avec une dispersion suffisante, l'observation des raies les plus intenses est plus facile à réussir, en dehors des éclipses, que la photographie directe de la couronne et même que l'étude de sa polarisation.

J'ai observé, pour la première fois, le 30 Juillet 1930, le spectre de la couronne en formant l'image donnée par le coronographe sur la fente d'un spectroscopie à vision directe auquel on pouvait adapter une chambre photographique de 40 cm. de foyer. Malgré sa faible dispersion, cet appareil m'a permis de voir et de photographier les deux raies les plus fortes du spectre visible, la raie verte et la raie rouge.

Appareils. En 1931, j'ai réalisé une installation plus importante avec un coronographe plus grand et des spectrographes beaucoup plus dispersifs dont l'un était transformable en spectrohéliographe. La fig. 8 représente le schéma général de l'installation.

Les spectrographes sont montés à l'intérieur du tube du télescope G' . Ce tube mesure 6 m. de long; à sa partie inférieure, le barillet du miroir a été remplacé par un panneau de bois N qui porte la fente et le porte-chassis communs aux deux spectrographes; l'ouverture supérieure est fermée par un panneau semblable N' .

L'objectif achromatique du coronographe a été remplacé par une lentille simple F qui forme l'image de la couronne sur la fente R des spectrographes, après réflexion sur les deux prismes à réflexion totale O et O' . Le deuxième prisme est suivi d'un filtre coloré P qui isole le domaine spectral étudié et d'une lentille de champ Q . Cette lentille forme l'image du diaphragme D , soit sur le réseau S , soit sur le prisme T suivant l'orien-

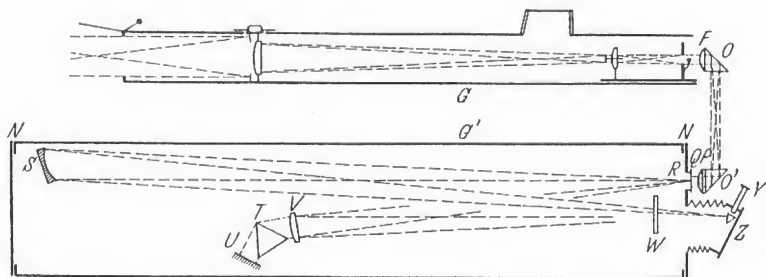


Fig. 8. Disposition générale du coronographe et des spectrographes.

tation que l'on donne au prisme O' . Les pièces optiques, O et F , d'une part, $O'P$ et Q , de l'autre, sont collées à l'huile de ricin pour diminuer les pertes de lumière.

L'un des spectrographes a, pour organe dispersif, le réseau S . C'est un réseau concave de Rowland de 7 m. de rayon de courbure et de 14,5 cm de surface striée, il est utilisé dans le deuxième ordre, il forme l'image du spectre sur la plaque photographique placée en Z . Les rayons traversent en W une lentille cylindrique convergente de 60 cm. de foyer dont l'axe est perpendiculaire aux raies du spectre; cette lentille corrige le fort astigmatisme introduit par le réseau, elle réduit au sixième la largeur du spectre et elle réduit aussi le temps de pose dans les mêmes proportions. Cet ensemble donne une dispersion de 1,2 Å par millimètre mais il est peu lumineux.

L'autre spectrographe a, pour organe dispersif, un bon prisme T de 61°, en flint, dont les bases mesurent 15 cm.; le prisme travaille à retour de rayons entre un miroir plan U et une lentille simple V de 3,60 m de distance focale. Cet ensemble donne d'excellentes images, avec une dispersion

de 5 Å par mm., dans le vert, et des temps de pose 15 fois plus courts que le réseau.

Lorsque l'on emploie le prisme, il faut supprimer la lentille *W*.

Le tube du télescope subit des flexions variables avec sa position dans l'espace et les raies spectrales se déplacent constamment. L'observateur

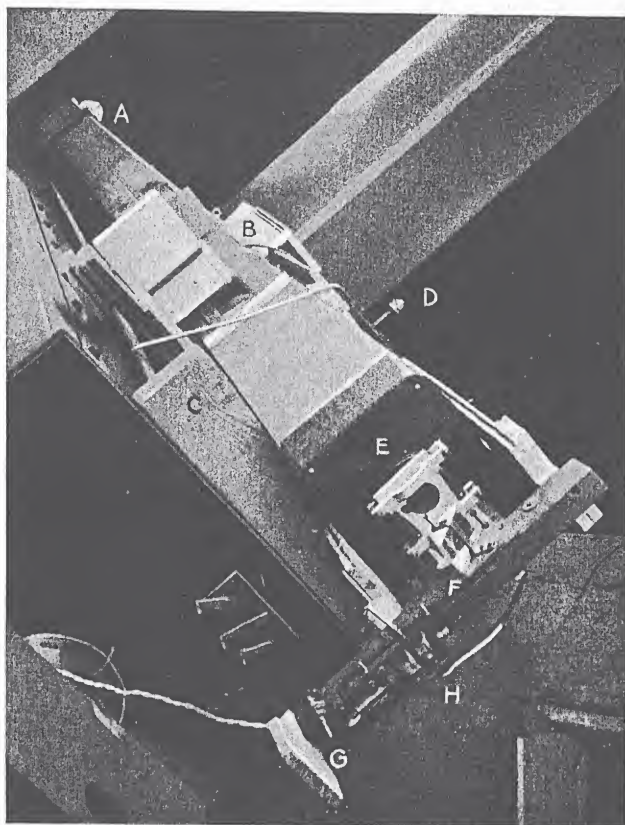


Fig. 9. Le coronographe fixé au long de l'équatorial du Pic-du-Midi.

corrige ces déplacements pendant toute la durée des poses photographiques. Pour cela, il suit, avec un microscope *Y*, lié au porte-chassis, une image monochromatique d'un petit trou situé près de la fente *R* du spectrographe et éclairé toutes les minutes par un arc au fer.

Le spectrographe à prisme peut être facilement transformé en spectro-héliographe en fixant, devant la plaque, une deuxième fente qui isole une

raie ou une portion du spectre. Le déplacement de l'image de la couronne, sur la première fente, s'obtient en faisant tourner le prisme *O* autour de son axe. Le déplacement de la plaque derrière la deuxième fente s'obtient en faisant coulisser le porte-chassis dans sa glissière *Z*.

Le cliché reproduit fig. 9 montre le tube du coronographe porté par ses deux colliers *A* et *B*. Ce tube est immobilisé par une cale *C* et une vis

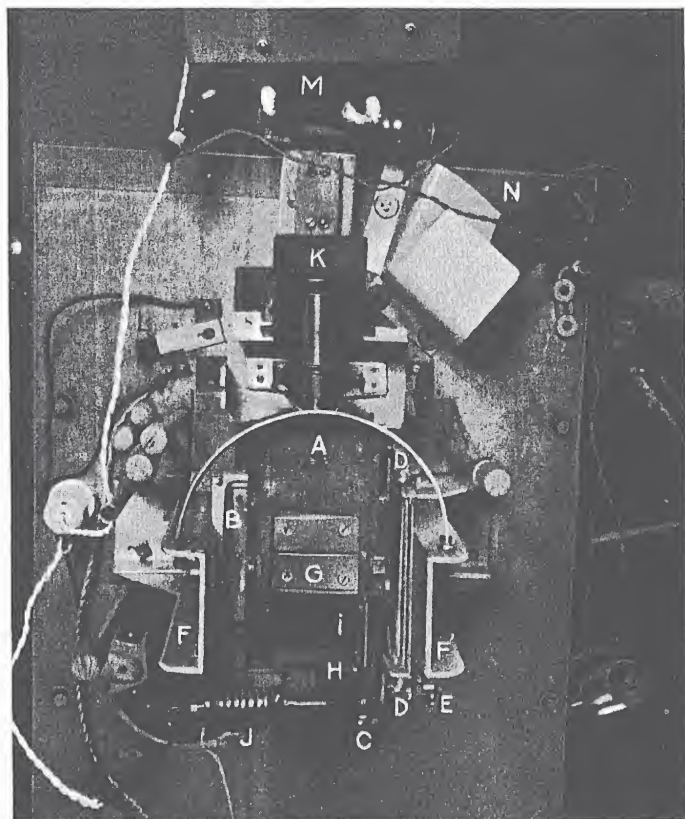


Fig. 10. Le porte-chassis et les commandes des spectrographes et du spectroheliographe.

de serrage *D* toutes les fois qu'on utilise les spectrographes. On voit, en *E*, le diaphragme iris et le petit écran placé en son centre et, en *F*, le premier prisme à réflexion totale qui renvoie l'image de la couronne vers le bas. Ce prisme est porté par une plateforme triangulaire dont l'extrémité inférieure est poussée par un écrou monté sur une vis à pas fin *G*. Cette vis est mise

en rotation par une roue à cliquet que le noyau d'un électro-aimant à longue course *H* actionne au moyen d'un fil tendu par un élastique.

La fig. 10 représente le panneau de bois qui remplace le barillet du télescope et qui porte une foule d'accessoires divers. Vers le milieu, en *A*, se trouve le porte-chassis et son microscope. Il est porté par le cadre *B* contre lequel il est appliqué par de forts ressorts de rappel; ces ressorts le maintiennent aussi en contact avec la vis *C* et avec les deux cames *D* et *D'* que l'on peut faire tourner avec la vis *E*. Les deux vis de rappel *C* et *E* permettent de déplacer le porte-chassis dans deux directions rectangulaires. Le cadre *B* est serré par des écrous à oreilles contre les deux équerres *F* et *F'* fendues dans le sens de leur longueur; on peut l'avancer ou le reculer et l'incliner à volonté pour mettre le spectre au point sur toute l'étendue de la plaque. L'ouverture du porte-chassis est fermée par la seconde fente *G* du spectrohéliographe. Le chassis est poussé, dans sa glissière, par un écrou *H* et une vis *I* actionnée, comme l'autre, par un électro-aimant *J*. Les électro-aimants sont alimentés à travers une roue à contacts embrayée avec le mouvement d'horlogerie; on peut régler à volonté leur course et la cadence de leurs déplacements.

Un peu plus haut, en *K*, se trouve une petite chambre noire au fond de laquelle l'observateur voit une image du disque masquant le Soleil entourée d'une frange colorée. D'après l'aspect de cette frange, il agit sur les rappels du télescope pour maintenir le Soleil centré derrière le disque. S'il voit le champ s'éclaircir par le passage de très légères nébulosités, il ferme l'interrupteur *L* qui arrête la roue à contacts et tous les mécanismes du spectrohéliographe et qui obture, en même temps, la première fente. Pendant toute la durée de la pose, un deuxième observateur allume, toutes les minutes, l'arc au mercure *M* ou l'arc au fer *N* et corrige les déplacements des raies. On voit, en *O*, le deuxième prisme à réflexion totale qui renvoie, sur la première fente, l'image de la couronne. Il est suivi d'un filtre coloré et d'une lentille de champ. L'ensemble est porté par deux équerres fendues permettant la mise au point de cette image.

Le panneau est traversé par 7 tubes d'aluminium visibles en *P*, *Q* et *R*, permettant de faire, à distance, tous les réglages des deux spectrographes. La trappe *S* permet de mettre en place ou de retirer la lentille cylindrique du spectrographe à réseau et de faire sa mise au point.

La fig. 11 représente le prisme *A* du spectroscopie placé entre le miroir *B* et la lentille *C*. Il est traversé deux fois par les rayons, ce qui double sa dispersion. L'ensemble est commandé par cinq flexibles terminés par cinq

tubes en aluminium de 4 m. de long. Les flexibles *D* et *E* permettent de faire tourner de miroir autour de deux axes rectangulaires pour faire défiler le spectre ou pour le déplacer latéralement; le flexible *F* fait tourner le prisme autour de son axe pour le mettre au minimum de déviation; les flexibles *G* et *H* permettent d'incliner la lentille autour de deux axes rectangulaires pour corriger l'astigmatisme du prisme. Le prisme est

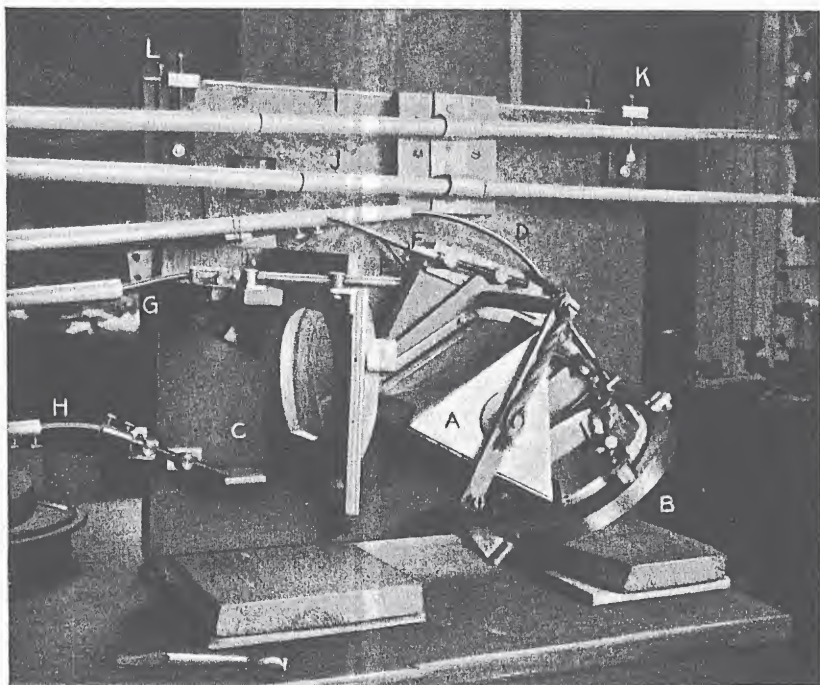


Fig. 11. Bâti portant le prisme, son miroir et sa lentille ainsi que les 7 tubes des commandes.

légèrement diaphragmé à la base et l'ensemble donne des images excellentes. A la partie supérieure, on voit passer deux tubes *I* et *J* de 6 m. de long qui permettent d'incliner le réseau autour de deux axes rectangulaires. Le tout est porté par un solide bâti en bois que l'on peut bloquer en position convenable, dans le tube du télescope, au moyen des quatre vis calantes *K* et *L*.

Voyons maintenant les résultats obtenus avec ces appareils.

Raie verte. La partie extérieure de la fig. 12 reproduit une épreuve par sections obtenue au spectrohéliographe, le 22 Juillet, de 9 h. à 12^h10,

avec une série de poses de 10 minutes. L'image solaire mesure 30 mm sur le négatif. Le ciel était bien transparent mais, malheureusement, le cliché a été voilé par une fuite de lumière rasante. La première fente mesure $\frac{5}{100}$ de mm, la deuxième mesure 2 mm de large, elle isole une portion du spectre de 10 Å. L'image de la couronne et la plaque photographique sont déplacées de 2 mm. toutes les 10 minutes de manière à obtenir l'aspect de la raie verte tout autour du Soleil.

Les raies solaires sont les mêmes sur chaque section, si l'on tient compte des différences dues aux variations d'intensité de la lumière atmosphérique d'une pose à l'autre. La raie brillante varie, au contraire, beaucoup d'un point à l'autre de la couronne. Elle atteint son maximum d'intensité à l'Est, au-dessus de l'équateur; au Nord-Est, on peut la suivre sur le négatif jusqu'à 9' du bord solaire. Elle paraît subir, par endroit, quelques légères déviations correspondant à des vitesses radiales très faibles.

Si l'on compare cette épreuve du 22 Juillet au cliché direct du 21, placé au centre, il semble bien que la lumière de la raie verte soit répartie d'une manière assez analogue à celle du spectre continu de la couronne mais avec des inégalités beaucoup plus fortes.

La fig. 13 montre, au centre, une image monochromatique continue obtenue le 7 Août, de 11^h40 à 13^h15, en réduisant beaucoup la course des électro-aimants et en augmentant beaucoup la fréquence de leurs mouvements. La première et la seconde fente ont chacune $\frac{2}{10}$ de mm.; elles isolent une portion du spectre de 1 Å, contenant la raie verte. La couronne est très pauvre, elle montre seulement un beau jet à l'Ouest, sur l'équateur; ce jet contient quelques filaments obliques semblables à ceux que l'on observe en lumière blanche, pendant les éclipses¹⁾. Malheureusement, l'image est traversée par des rayures blanches dues au passage de nébulosités très légères.

La partie extérieure de la même fig. représente une épreuve par sections obtenue le même jour, de 14^h45 à 18^h10, avec des poses de 10 minutes. Nous retrouvons la raie verte, très forte à l'endroit correspondant au jet de la photo précédente. Elle est très faible sur tout le reste de la couronne. Ce jet était situé au-dessus d'un groupe de taches et de plages faculaires, le seul groupe important présent sur le Soleil. Le même

¹⁾ Des filaments semblables ont été photographiés pour la première fois par Mitchell, pendant l'éclipse du 21 Octobre 1930, avec un prisme objectif. Cette structure est confirmée par nos deux observations faites en toute indépendance et avec des moyens très différents.

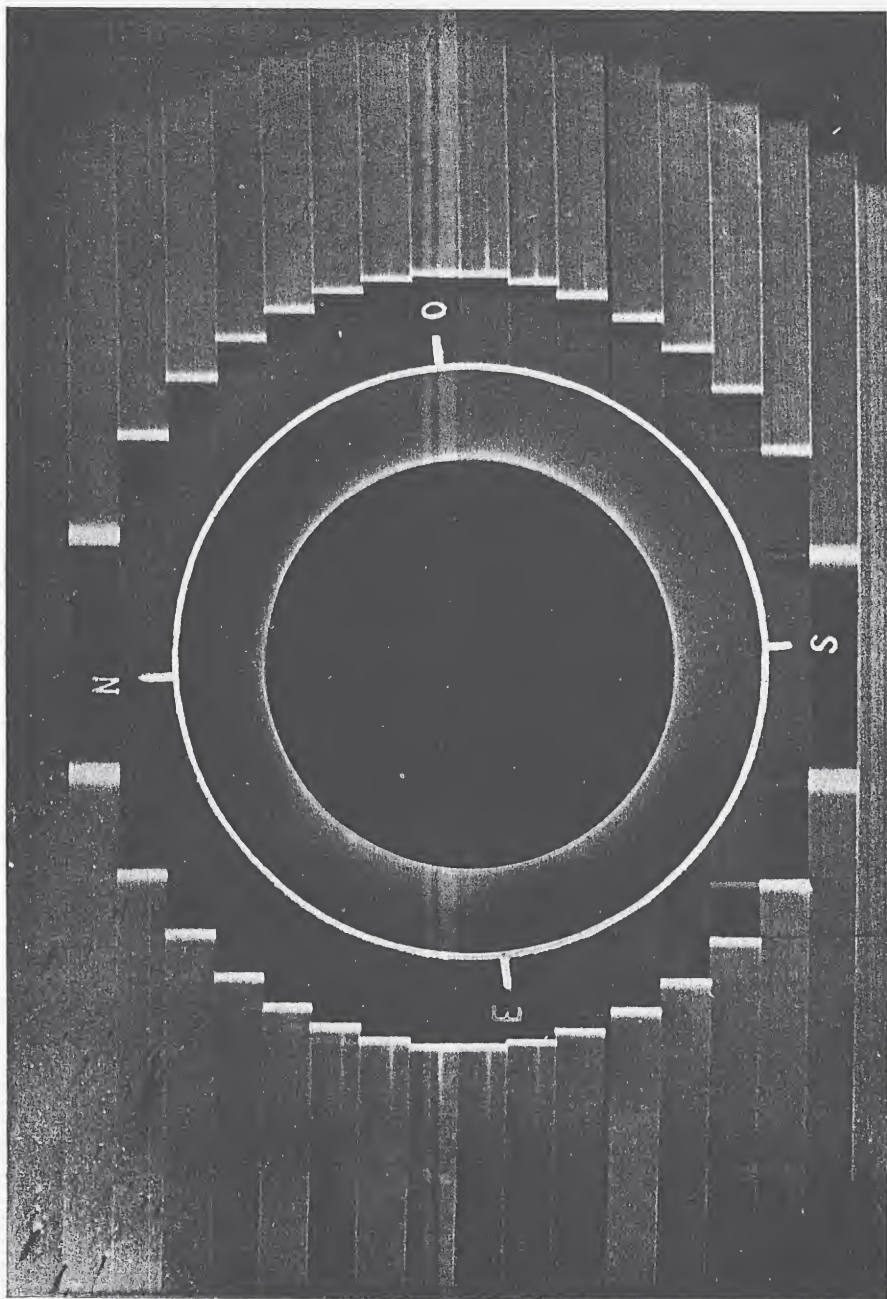


Fig. 12. Au centre, photographie directe de la couronne, obtenue le 21 Juillet à 16 heures. A l'extérieur, épreuve par sections obtenue au spectrohéliographe, le 22 Juillet de 9^h à 12^h10 et montrant les variations de la raie verte tout autour du Soleil.

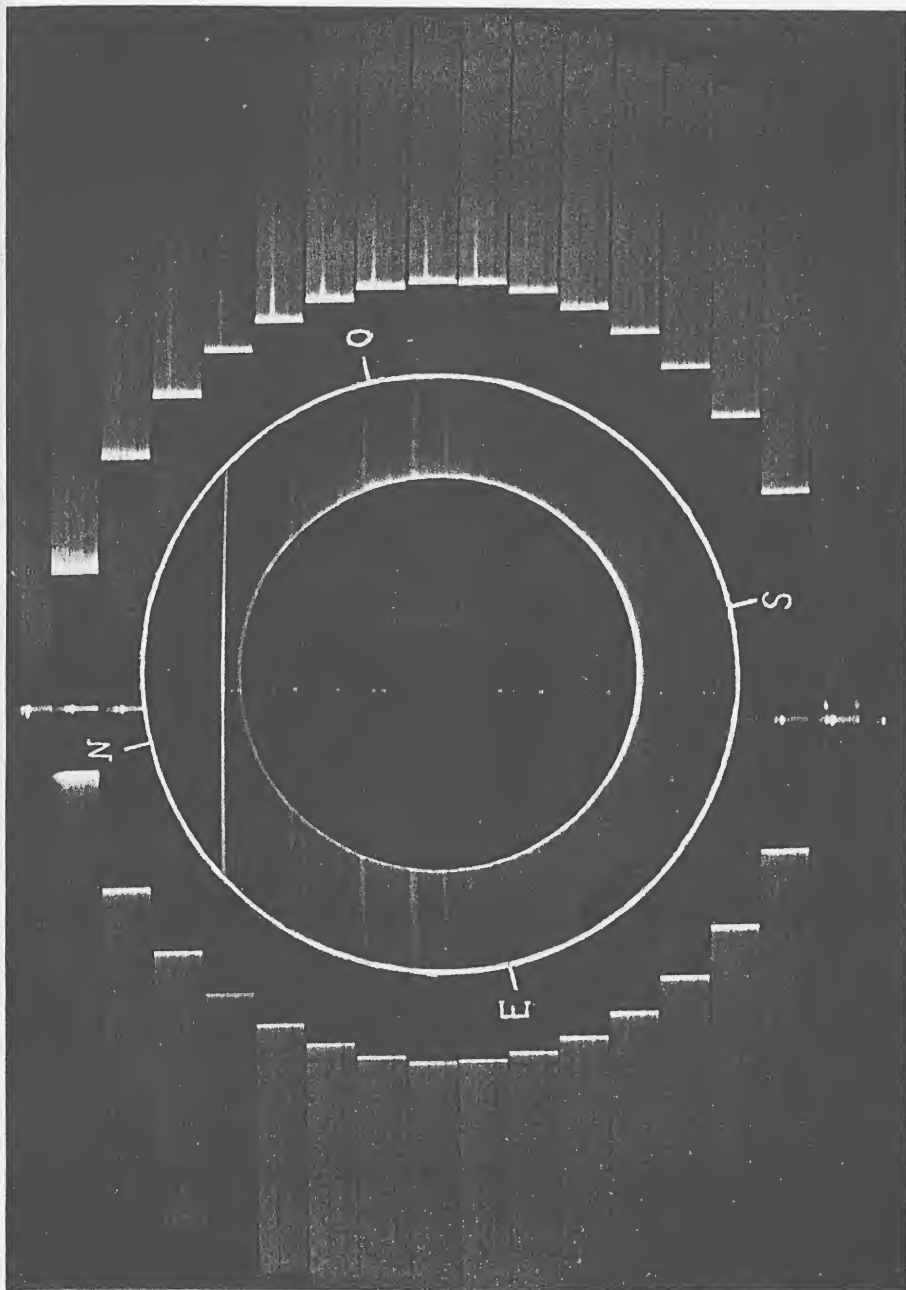


Fig. 13. Au centre, image monochromatique donnée par la raie verte, obtenue au spectrohéliographe, le 7 Août, de 11^h 40 à 13^h 15.
A l'extérieur, épreuve par sections obtenue le même jour, de 14^h 45 à 18^h 10 et montrant les variations correspondantes de la raie verte.

cliché, plus fortement agrandi sur la fig. 14, montre la raie verte large; sa largeur n'est pas due au spectroscopie. Sur le négatif, la raie mesure $0,9 \text{ \AA}$ tandis qu'on sépare complètement le triplet voisin dont les raies sont distantes de $0,7 \text{ \AA}$. Cette largeur apparaît encore mieux sur le spectre reproduit fig. 15. Ce spectre a été pris également le 7 Août, de $7^{\text{h}}40$ à $9^{\text{h}}40$, avec le réseau concave et une dispersion de $1,2 \text{ \AA}$ par mm. sur le négatif. La fente, dirigée Est-Ouest, traversait le jet de la fig. 13. Le spectre est très rapetissé en largeur par la lentille cylindrique. On voit,

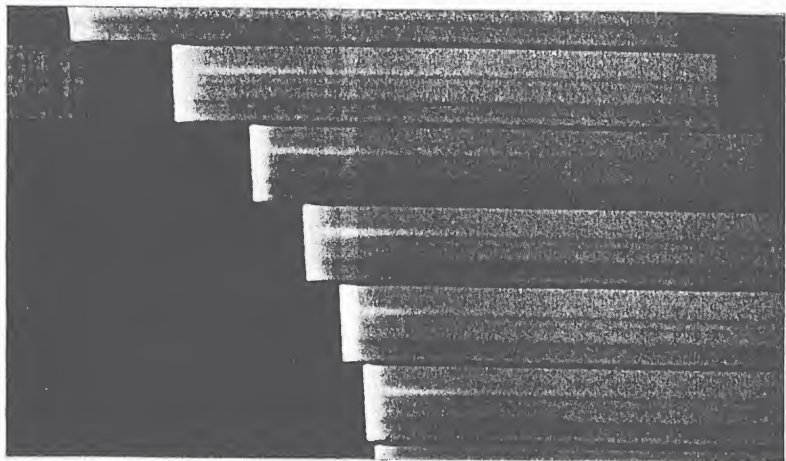


Fig. 14. Portion du cliché président, agrandie 5 fois, montrant la largeur de la raie verte comparée à celle des raies solaires.

au centre, une traînée brillante due à l'arc au fer; de part et d'autre, le spectre du disque en carton bordé, de chaque côté, par la frange de diffraction; à droite et à gauche, le spectre de la lumière du ciel, avec les raies solaires. En bas, on retrouve le triplet de la photo précédente dont une raie se montre quadruple, sur le négatif, avec des composantes serrées à $\frac{2}{10}$ d' \AA . Plus haut, la raie brillante apparaît, très forte à l'Ouest, très faible à l'Est; sa largeur totale est de $1,2 \text{ \AA}$ ainsi qu'on peut en juger d'après les divisions qui donnent les longueurs d'onde en \AA internationaux. La courbe de lumière de la raie, relevée au microphotomètre, est très régulière et bien symétrique si l'on tient compte du crochet dû à la raie voisine 5302,3.

Ces trois derniers clichés ont été pris le même jour, par un ciel bien transparent et le total des poses est de 7 h. Si l'on ajoute le temps employé

pour les changements d'appareils et pour les réglages, on voit que la couronne a été observable, dans de très bonnes conditions, pendant plus de 11h. consécutives.

L'intensité de la raie verte a été mesurée sur les clichés, au micro-photomètre et comparée à celle du spectre continu solaire, par l'intermédiaire du diffuseur. La lumière de la raie, près du bord solaire, a atteint, par endroit, les 70 millionnièmes de celle de 1 \AA du spectre continu solaire, elle s'est abaissée, par endroit, au-dessous de 3 millionnièmes.

Ces épreuves permettent de déterminer la longueur d'onde de la raie verte. Contrairement à ce que l'on pouvait espérer, le spectre pris avec le réseau ne donne pas une meilleure précision que les spectres pris avec les prismes. La précision est limitée seulement par la largeur de la raie verte. Au contraire, avec les épreuves par sections, on peut mesurer un grand nombre d'images ce qui diminue beaucoup l'erreur probable. Les mesures ont été faites à Meudon, par M. H. GRÉNAT qui a trouvé, sur 36 images de la raie, une moyenne de $5302,83$, à l'Est et $5302,87$, à l'Ouest, en Angströms internationaux, avec une erreur probable de 3 ou 4 centièmes. La différence de ces deux valeurs, de $\frac{4}{100} \text{ d'Å}$, est très incertaine; elle correspondrait à une rotation un peu plus lente que celle du Soleil. La moyenne, de $5302,85$, paraît déterminée avec une précision supérieure à celle que l'on obtient pendant les éclipses, sur un plus petit nombre d'images prises avec des spectrographes nécessairement beaucoup moins dispersifs.

Raie rouge. Le spectre de la couronne contient, dans le rouge, une autre raie parfois assez intense; sa photographie a nécessité cependant des poses beaucoup plus longues que celle de la raie verte, ce qui m'a empêché d'utiliser le réseau.

J'ai obtenu, du 16 au 28 Août 1931, 7 spectres et deux épreuves par sections montrant la raie rouge avec une dispersion de 11 Å par mm. et des poses de 30 minutes à $2^{\text{h}}30$. Voici, fig. 16, une portion d'un de ces clichés obtenu le 27 Août, de 16h. à $16^{\text{h}}30$, sur une plaque hypersensibilisée

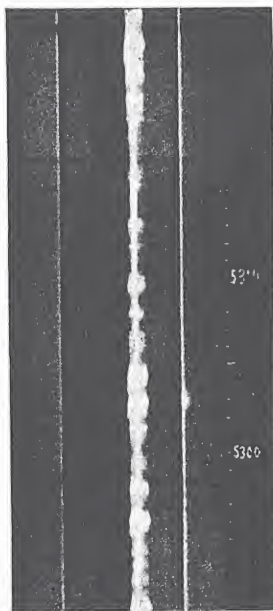


Fig. 15. Spectre obtenu au réseau concave, dans le 2^{ème} ordre, montrant la largeur de la raie verte.

à l'ammoniaque. Elle montre, à la partie inférieure, la raie brillante au bord Est et, à la partie supérieure, la raie $H\alpha$. Les divisions tracées à droite donnent les longueurs d'onde en Å et celles qui figurent à la partie supérieure donnent les distances au bord solaire, exprimées en minutes.

Sur certaines plaques, la raie s'est élevée jusqu'à 6' du bord solaire. Elle semble plus large que les raies de FRAUENHOFER; avec une dispersion

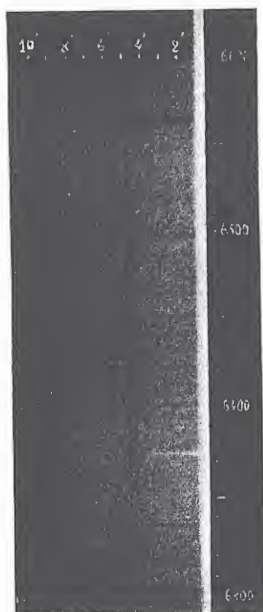


Fig. 16. Spectre montrant la raie rouge au bord Est, obtenu avec le prisme, le 27 Août, de 16^h à 16^h 30.

plus forte, sa largeur se montrerait, sans doute, comparable à celle de la raie verte. Son intensité a atteint les 20 millionnièmes de celle de 1 Å du spectre continu solaire; les épreuves par sections montrent cette intensité très variable d'un point à l'autre, cependant, la raie a été photographiée jusqu'au pôle Nord. La raie rouge paraît subir, sur les diverses images, des déformations qui ont diminué la précision des mesures de longueurs d'ondes. Ces mesures, faites à Meudon par M. H. GRENET, sur les quatre meilleurs clichés, ont donné 6374,75 Å internationaux avec une erreur probable de 0,15.

Autres radiations. J'ai effectué également, du 10 au 12 Août 1931, une série de spectres dans le bleu et dans le violet, avec le prisme et une dispersion de 2 Å par mm. Ces spectres auraient dû contenir les radiations coronales 4232, 4086 et 3986 qui ont, en général, une intensité comparable à celle de la raie rouge. Ces raies n'apparaissent pas. De bonnes épreuves par sections, portant sur des longueurs

d'ondes voisines de celles des deux premières radiations, ne les montrent pas non plus. L'intensité de ces raies ne devait donc pas, semble-t-il, dépasser 6 millionnièmes de celle de 1 Å du spectre solaire. Ces épreuves ont été prises le 11 et le 12 Août et, à ces dates, les cartes planisphères de Meudon ne montrent, près du bord solaire, aucune région dont l'activité soit importante.

Les résultats que nous venons d'exposer ont été obtenus à une époque où l'activité solaire était déjà très réduite. Les observations qui seront faites lors du prochain maximum fourniront, sans doute, sur la couronne, des documents beaucoup plus complets.

Nous possédons désormais trois méthodes permettant d'étudier la couronne en tout temps et de suivre ses modifications progressives.

Parmi ces méthodes, la photographie directe de la couronne est encore d'une application difficile et donne, pour le moment, des résultats très inférieurs à ceux que l'on obtient pendant les éclipses.

Les mesures de polarisation fournissent un moyen plus commode de déterminer la forme de la couronne en utilisant également les radiations du spectre continu.

L'étude des raies brillantes, au spectroscopie et au spectrohéliographe, est la méthode la plus intéressante en dehors des éclipses. La lumière diffusée augmente l'intensité du spectre continu de la couronne sur lequel ses raies se projettent mais cette augmentation est compensée, dans le vert et surtout dans le rouge, par l'accroissement de la dispersion des spectrographes. Enfin, le temps très long dont on dispose permet de mettre à profit tous les avantages du spectrohéliographe et d'obtenir les formes des vapeurs, leurs mouvements, la longueur et l'intensité des raies qu'elles émettent d'une manière plus précise et plus complète qu'on ne pourrait le faire pendant les éclipses.

Ce travail a été facilité par la maison Parra-Mantois qui m'a offert deux excellents disques de verre d'optique, par l'Institut d'Optique qui s'est chargé de tailler la lentille du coronographe et par Monsieur CALZAVARRA qui m'a procuré une série de plaques particulièrement sensibles. Je suis heureux de pouvoir leur exprimer toute ma reconnaissance.
